

急流河川における洗掘深測定法の基礎的検討

広島大学大学院 学生会員 ○吉田 晋 広島大学大学院 フェロー会員 河原能久
中央大学研究開発機構 正会員 内田龍彦

1. 序論

近年、全国各地で急流河川やそれに隣接する道路の被災が多発している。広島県においても平成17年台風14号、平成18年台風13号によって太田川水系の支川を中心に甚大な洗掘・侵食被害が発生した。急流河川における堤防の侵食に対しては、河床洗掘に伴う最大洗掘深の評価や流水による侵食幅の設定に基づき護岸の設計を行っているが、被災原因を究明することが必要となっている。また、堤防の維持管理の強化をはかるために、現状の堤防や河岸の状況を把握し、侵食被害を未然に防ぐことの必要性が高まってきている¹⁾。しかし、洗掘の実態を把握できていないことが大きな障害となっている。現在、洗掘深の計測技術が開発されつつある²⁾が、試験段階のものが多く、信頼性や実用性の高い計測技術は確立されていない。とりわけ、巨礫が移動する急流河川に適用できる洗掘深計測技術の開発は焦眉の課題となっている。

本研究は、急流河川における洗掘深を洪水中に連続的に測定し、多数の地点に設置するために低廉である計測器の開発を目標としている。そのための第一段階として、河床低下に伴ってブロックが流出すると電気抵抗が変化し、その変化量から洗掘深を測定する機器を試作した。

2. 既往の洗掘深測定法と本研究における洗掘深センサーの概要

(1) 既往の洗掘深測定法

洗掘深の調査では、これまで河床に埋め込んだレンガブロックや色砂の残存量を出水後に掘り起こし、最大洗掘深を計測する方法がとられていた。しかし、河床材料の粒径が大きい急流河川においては掘り起こすための労力や費用が甚大となる。また、原理的に洪水時の最大洗掘深と埋め戻し量しか計測することができず、出水中の状況をリアルタイムに把握することができないことや、レンガブロックが河床高さの変化に追随するかなどの問題がある。

最近、レンガブロックの代わりに、電波を発信するセンサーを河床部に埋め込み、洗掘により浮上したセンサーが発信する電波を護岸部の受信機で受信し、センサーIDと受信時刻を記録することにより、洗掘箇所や洗掘深を把握する技術が開発されている^{2),3)}。これは河岸の侵食状況をリアルタイムに把握することを可能にするものである。しかし、設置後にセンサーの動作確認が行えないこと、急流河川に適用する場合において流されたセンサーが受信範囲内で水面に浮上するのか、礫などの衝突に耐えられるかなどについて検証が必要であると推察される。

(2) 洗掘深センサーの原理

本研究では洗掘深を電気抵抗の変化として取得する方法を考える。センサーの概要を図-1に示す。各ブロックに抵抗器を埋め込み、ブロック上下面に腐食しない電極部を設け、それらを積み重ねることによってブロック群として並列回路を構成する。最上部のブロックが流失すると、残存ブロック群の抵抗値が変化するが、その変化量から洗掘深を定量的に把握するというものである。なお、ブロックは塩ビ製であり、その内部に砂などを詰めて重量を調整している。なお、デー

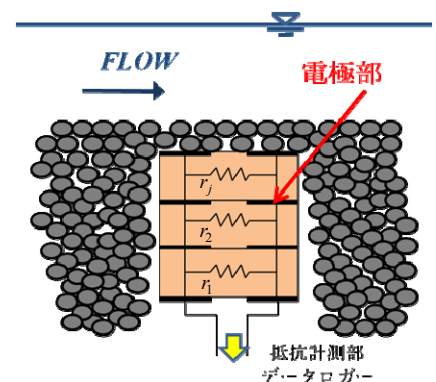


図-1 洗掘深センサーの概念

タロガーやバッテリーはブロック群の下にボックス内に設置され、有線または無線で送受信される予定である。本研究では上部のブロック群であるセンサーの挙動について検討する。

(3) 動作状況と課題

実験水路において、河床に設置されたブロック群がどのような挙動を示しながら流出するのかを観察するとともに、電気抵抗を計測した。実験では可変勾配型直線水路（全長 24m、水路幅 0.2m）を用いた。水路床に平均粒径 2.3cm の礫を敷き、一辺が 3cm の立方体のブロック（内部に抵抗 $1k\Omega$ を設置）2 個をデータ取得用ブロック（ブロック上面に電極を有し、抵抗値を外部へ有線で出力する）の上に載せ、サンプリング間隔 1 秒で電気抵抗を計測した。初期の河床勾配を 1/15 とし、流量 40.0ℓ/sec を通水し、疑似等流状態で河床低下とブロックの挙動を観察した。

図-2 に流水中でのブロックの挙動を示す。図 (a) では最上段のブロックが少し浮き上がっており、図 (b) ではそのブロックが流出している。また、図 (c) では残ったブロックの上部で礫が移動しており、図 (d) では礫がブロックの上に乗っている。

図-3 は、図-2 の実験時の電気抵抗の変化を示している。160sec 以前では抵抗値は 500Ω であり、その値は 2 個のブロックが残存していることと一致している。一方、167sec 時点では電気抵抗値は 2000Ω を超えており、全ブロックが流出した状態となっている。これは最上段のブロックが浮き上がった際に 2 段目のブロックと最下部のデータ取得用ブロックの電極が離れた状態になったためである。なお、その原因は細粒分が電極間に挟まったためではない。200sec 付近を除き、260sec 時点ごろまでその状態が続いている。礫がブロックの上部にしっかりと乗った 265sec 時点以降ではブロック 1 個を検出している。

以上の結果より、ブロックの流出に伴う電気抵抗の変化は、ブロック内部に埋め込む抵抗の大きさを工夫すれば、容易に検出可能であり、したがって洗掘深を推定する可能性は高い。しかし、礫の衝突や、最上部のブロックの転動によるブロックの振動や最下部の電極部の接触不良を抑制することの必要性が明らかとなった。これに対する解決策はまだ見出せていないが、電極部の材質（導電性ラバーなど）やブロックの重量などを検討する予定である。

3. ブロック諸元の決定方法

(1) ブロック移動限界高さとは河床高の関係

ブロックの残存個数から洗掘深を算出するためには、ブロックが河床低下に追随するように流出することが不可欠であり、そのようにブロック諸元を決定することが必要である。ここでは、ブロックの流出時におけるブロック諸元と河床高の関係式、すなわち、ブロック諸元の算定式を導出する。そして、水理実験によって算定式中の実験定数を決定する。

礫が移動限界状態にあるとき、ブロックも移動しようとしていると仮定する。このときブロック

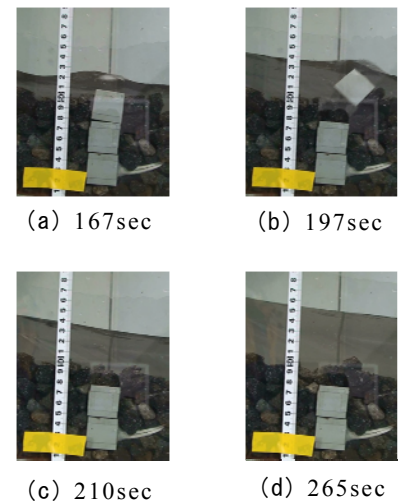


図-2 ブロックの挙動

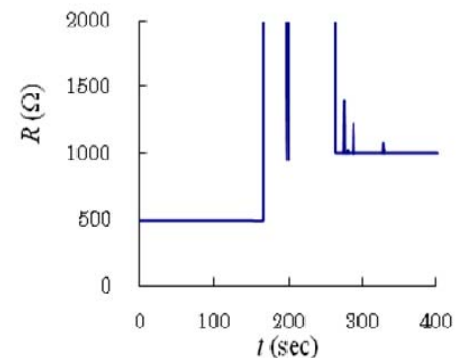


図-3 ブロック群の抵抗の時間的变化

に作用する流体力 F とブロックに接近する代表流速 u_b は次のように表される.

$$F = C_D A \frac{\rho}{2} u_b^2 \quad (1)$$

$$\frac{u_b}{u_{*c}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{\beta y}{\alpha d} + A_r \quad (2)$$

ここで, y : 河床面からブロック上面までの高さ, β : ブロックに作用する流速の位置を表す定数である. また, 平坦な河床における相当粗度 k_s を河床材料の平均粒径 d の α ($=2\sim3$) 倍としている. 一方, ブロックの移動限界状態は式 (3) で表される.

$$F = W_w \tan \varphi \quad (3)$$

$$D = \frac{W_w}{bk \frac{\rho u_{*c}^2}{2}} = \frac{C_D}{\tan \varphi} \frac{y}{k} \left(\frac{1}{\kappa} \ln \frac{\beta y}{\alpha d} + A_r \right)^2 \quad (4)$$

ここで, W_w : ブロックの水中重量, φ : 移動限界角度, b : ブロック幅, k : ブロック高さ, C_D : 抗力係数, d : 河床材料の平均粒径, y : 河床面からブロック上面までの高さ, β : ブロックに作用する流速の位置を表す定数である. 転動の場合には直方体であれば $\tan \varphi = L_s / h_b$ となる. ここで, h_b : 抗力の作用点位置と転動点との垂直距離であり, y や d の関数となる. また, L_s : ブロックの重心位置と転動点との水平距離である.

式 (4) の左辺はブロックの諸元で決定されるが, 右辺は y の関数である. そこで, 式 (4) をブロックの諸元の算定式とし, その妥当性と式中の定数値を水理実験により検討する.

(2) 水理実験

全長 24m, 水路幅 0.2m の可変勾配型直線水路内に平均粒径 2.3cm の礫を敷き詰め, 初期河床勾配を 1/10 とした. 礫床にブロックを設置した. 下流の堰を用いて河床材料が動かないように水を貯めた後, 流量 40.0 l/sec を通水し, 河床低下を引き起こし最上段のブロックを流出させた. 最上段のブロックが流出した時の検査区間 (0.5m 長さ) の上下流端の水位, 区間内の 4 地点での水位, 水深を計測した. そして, 運動量則に基づき平均底面剪断力, 限界摩擦速度を算出した. また, ブロック流出の直後に通水を止め, ブロック周りの礫の最頂部の高さを計測した. ブロック最上段の上面と礫最頂部の高さの平均値との差 y を算出した.

表-1 に実験条件と実験結果を示す. ブロックは一辺が 3cm の立方体であり, 塩ビ製である. ブロックの重量 W はブロックに砂とともに混ぜる小径の鉛の量を増加させることによって変化させた. 実験はほぼ同一な初期条件のもとで繰り返して行い, 得られた結果の平均値である $\tan \varphi$ や限界摩擦

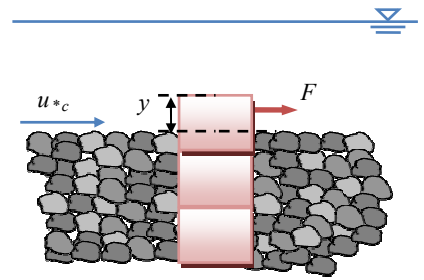


図-4 移動限界状態での流体力

表-1 実験条件

	重量 $W(g)$	$\tan \varphi$	$u_{*c}^2 (cm^2/s^2)$	実験回数
1	38.2	0.87	441	3
2	38.2	0.84	440	3
3	49.3	0.84	452	1
4	58.4	0.75	542	3

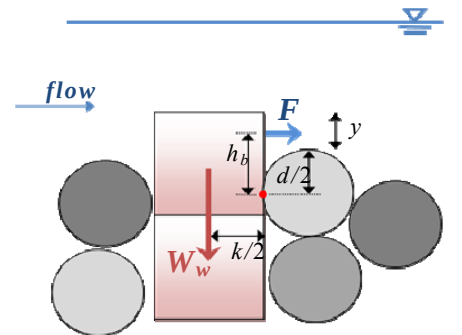


図-5 ブロックの転動点の位置

速度の2乗の値を表中に記している．ブロックは転動して流出するが，転動点の位置は図-5のようになり， $\tan\phi$ は次式（5）で計算される．

$$\tan\phi = \frac{L_s}{h_b} = \frac{k}{y+d} \quad (5)$$

（3） 諸元の決定と河床面の推定方法

図-6に実験結果を示す．図の横軸は式（4）の左辺の D である． $C_D=1$ として β/α の値を最小二乗法により求めると $\beta/\alpha=0.28$ となり，式（4）は次式（6）のようになる．

$$D = \frac{W_w}{bk \frac{\rho u_{*c}^2}{2}} = \frac{1}{\tan\phi} \frac{y}{k} \left\{ \frac{1}{\kappa} \ln \left(0.28 \frac{y}{d} \right) + A_r \right\}^2 \quad (6)$$

図-6より，式（6）は実験結果を良好に表現していると考えられる．

一方，式（6）はブロック諸元を算定式と読むことができる．適当な y/d を与えると式（6）から D が求まる． u_{*c} については，岩垣公式を用いて河床材料の平均粒径から算出できると仮定すると， W_w と bk のみの関係となり，ブロックの寸法を決めれば重量が算出されることとなる．

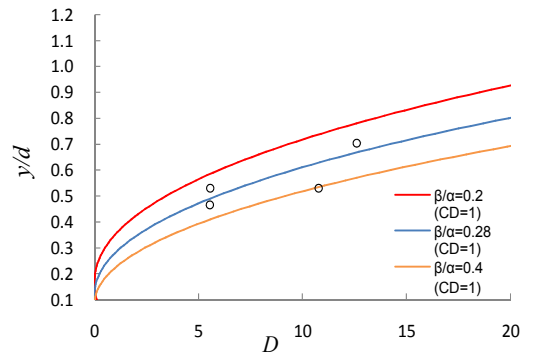


図-6 式（4）中の定数の決定

4. 結論

本研究は，急流河川における洗掘深を計測するために構造の簡単なセンサーを試作し，室内実験において基礎的な性能の検討を行った．得られた主要な結果は以下のようである．

- 1) ブロック群の電気抵抗の変化から流出したブロック数，したがって洗掘深を推定する方法を提案し，計測の可能性を示すことができた．しかし，同時に電極部の接触不良を改善する必要性が明らかとなった．
- 2) 計測ブロックの諸元の算定式を導出し，水理実験により定数を決定し，使用できる式を提案した．

参考文献

- 1) 国土交通省河川局治水課：河川堤防質的整備技術ガイドライン（案）および河川堤防モニタリング技術ガイドライン（案）の策定について，http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha04/05/050609_.html.
- 2) 末次忠司：洗掘センサ，「川の技術のフロント」（辻本哲郎監修，（財）河川環境管理財団編，技報堂出版），pp.40-41，2007.
- 3) （株）拓和：河床低下計測センサー，<http://www.takuwa.co.jp/mizu/index.html>.